TUNEL ŽABOVŘESKÁ – ZÁVĚREČNÉ ZHODNOCENÍ POHLEDEM ZHOTOVITELE
ŽABOVŘESKÁ TUNNEL – FINAL EVALUATION VIEWED BY CONTRACTOR

DALIBOR STROMČEK, ANDREJ KORBA

ABSTRAKT

Výstavba dvoukolejného tramvajového tunelu Žabovřeská je součástí Velkého městského okruhu města Brna. Jeho délka je 500 m, sestávající ze dvou přesypaných částí v celkové délce 167 m a ražené části v délce 333 m. Součástí tramvajového tunelu je také úniková štola dlouhá 55 m, která propojuje tunel a sousedící silniční galerii. Upravená trasa Žabovřeské ulice je vedena severojižním směrem údolím řeky Svratky, v rovinatém terénu v místě stávající komunikace I/42 a tramvajové tratě, a následně odklání tunel do areálu bývalého lomu. Tunel byl ražen metodou NRTM v podmínkách proterozoika Brněnského masivu pomocí trhacích prací. Práce na tunelu byly ovlivněny covidovými a post-covidovými podmínkami, se kterými se musela stavba vypořádat. Výsledkem byla netypická řešení, která v konečném důsledku umožnila vznik zajímavé podzemní konstrukce [1], [2].

ABSTRACT

The construction of the double-track tram tunnel Žabovřeská is part of the Large City Ring Road of the city of Brno. It is 500m long, consists of two false tunnel parts with a total length of 167m and a mined part with a length of 333m. The tram tunnel also includes a 55m long escape adit that connects the tunnel and the adjacent road gallery. The modified route of Žabovřeská street is led in a north-south direction through the Svratka river valley, in flat terrain at the location of the existing I/42 road and tram line, and then diverts the tunnel to the area of a former quarry. The tunnel was driven using the NATM method in Proterozoic conditions of the Brno massif using blasting. The *work on the tunnel was affected by the covid and post-covid conditions that the construction had to cope with. They resulted into atypical solutions that ultimately enabled the creation of an interesting underground structure [1], [2].*

1. ZÁKLADNÍ ÚDAJE O STAVBĚ

Stavba: I/42 Brno VMO Žabovřeská I, etapa II

- Investor: Ředitelství silnic a dálnic České republiky, Statutární město Brno
- Technický dozor: MORAVIA TDI MID, SHP TS s. r. o., SAFETY PRO s. r. o., Brněnské komunikace a. s.
- Dodavatel: „Společnost Žabovřeská – EUROVIA + HOCHTIEF + SUBTERRA“
- Smluvní podmínky: FIDIC – Red Book
- Zpracovatel RDS: METROPROJEKT Praha a. s.
- Geotechnický monitoring: GEOtest, a.s. a INSET s.r.o.

Dvoukolejný tramvajový tunel dlouhý 500 m, procházející ostrohem Wilsonova lesa v Brně – Žabovřeskách uvolňuje prostor stávajícího tramvajového tělesa ke zkapacitnění pozemní komunikace Velkého městského okruhu (obr. 1, 2). Má jeden tubus, je z větší části ražený, ale téměř třetinu jeho celkové délky tvoří hloubené příportálové úseky. Trasa s protisměrnými oblouky je provedená v podélném sklonu 0,5 %, střechovitě, s roztečí os kolejí 3,1 m. Tramvajový svršek v tunelu tvoří pevná jízdní dráha s pružně uloženými žlábkovými kolejnicemi.

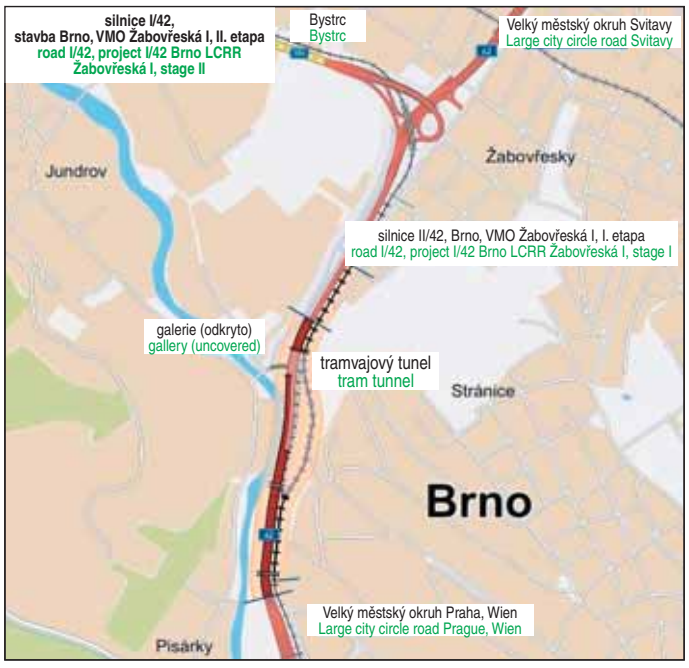
V ražené i přesypané části tunelu jsou umístěny čisticí výklenky pro rubovou drenáž, sloužící současně jako výklenky požární, součástí tunelu jsou ražené rozvodny NN R1 a NN R2 s napojením na únikovou štolu. V obou portálových částech tunelu jsou výklenky pro uložení ručních kolejových vozíků pro jednotky HZS, případně pro servisní a údržbářské práce.

Úniková štola je navržená jako chráněná cesta pro únik osob z tramvajového tunelu v případě havárie, požáru nebo jiné mimořádné události. Světlé rozměry únikové štoly pro pohyb osob jsou 1,7 × 2,5 m, délka je 55,47 m, vyúsťuje v silniční jednostranné galerii v místě nouzového servisního zálivu. Nechráněné únikové

1. BASIC CONSTRUCTION DATA

Project: I/42 Brno LCRR Žabovřeská I, stage II

- Project owner: Directory of Roads and Motorways of the Czech Republic, Statutory City of Brno
- Technical Supervision: MORAVIA TDI MID, SHP TS s. r. o., SAFETY PRO s. r. o., Brněnské komunikace a. s.



Obr. 1 Umístění stavby
Fig. 1 Construction location

Obr. 2 Pohled na severní hloubenou část a portál únikové štoly
Fig. 2 View of the southern cut-and-cover part and the portal of the escape adit

cesty v tunelu tvoří oboustranné chodníky šířky min 1,0 m podél tramvajové tratě. Povrch chodníků je z monolitického betonu v protiskluzové úpravě.

Svislé stěny portálů tunelu a navazující vnitřní klenbové části tunelu do vzdálenosti cca 50 m od ústí portálů jsou zevnitř opatřeny protihlukovým obkladem (obr. 3). Jedná se o perforované hliníkové lamely s minerální vlnou, třída reakce na oheň A.

2. GEOLOGICKÉ POMĚRY

Zájmové území patří do geomorfologické soustavy Brněnská vrchovina. Z hlediska regionálně-geologického spadá lokalita do proterozoika brněnského masivu. Litologicky se jedná o leukotonality (typ Jundrov) až kvarcdiority a metabazalty. Hornina zastižená ražením tunelu byla výrazně porušená, především tektonicky, což negativně ovlivňovalo postup ražeb a vedlo k nadvýlomům. Geologické podmínky a umístění stavby podrobněji popisuje článek [1].

3. RAŽENÝ TUNEL ŽABOVŘESKÁ

Tunel byl ražený Novou rakouskou tunelovací metodou. Realizace tunelu v primárním ostění byla v zadávací dokumentaci [3] dána podle kvality horninového prostředí třemi předpokládanými technologickými třídami výrubu (TTV) I, II a III. Projektem předpokládané zastižení TTV bylo pro každou třídu přibližně 1/3 délky tunelu. Rozpojování horniny bylo prováděno jak s využitím trhacích prací, tak i strojním rozpojováním, s mechanickým dočištěním líce výrubu. Profil tunelu byl horizontálně členěný na kalotu a opěří (lávku). Ražba tunelu probíhala od severního portálu směrem k jihu.

Pro primární ostění byl navržený stříkaný beton SB25 pevnostní třídy C20/25 s oborem nárůstu pevnosti J2 a stupněm vlivu prostředí XA1. Jako výztuž byly v TTV II a TTV III předepsány ocelové svařované KARI sítě Ø 6/100×100 do ostění tl. 200 mm. Pro ostění tl. 100 mm v TTV I bylo alternativně počítáno s využitím stříkaného betonu s rozptýlenou výztuží. Takový postup byl podmíněn

- Contractor: "The consortium of Žabovřeská – EUROVIA + HOCHTIEF + SUBTERRA"
- Contractual conditions: FIDIC – Red Book
- Author of detailed design: METROPROJEKT Praha a. s.
- Geotechnical monitoring: GEOtest, a.s. and INSET s.r.o.

Obr. 3 Jižní portál raženého tunelu
Fig. 3 Southern portal of the mined tunnel

dopracováním dodatku ke statickému výpočtu. Na základě průkazních zkoušek zhotovitele byl nakonec použit. Ražba a primární zajištění tunelu jsou podrobně popsány v článku [2].

4. REAKCE ZHOTOVITELE NA COVID-19 A NEDOSTATEK MATERIÁLŮ

Práce na tunelu Žabovřeská začaly v únoru 2021, ve vrcholící sezoně covid-19. Světová pandemie postihla rovněž výrobní odvětví, což mělo vliv na nedostatek některých materiálů potřebných pro kontinuální postup prací (nejen) na Žabovřeském tunelu. Tým zhotovitele proto začal hledat řešení, která by utlumila dopady krize na průběh výstavby. Ke „covidovým" příčinám přistoupily potíže způsobené kvalitou horninového masivu, která byla nižší, než jak ji předpokládala zadávací dokumentace.

TTV se lišily jak postupem rozpojování horniny, tak typem a počtem (výkonem) zajišťovacích prvků. Na základě všech dostupných informací o geologických a hydrogeologických poměrech byl v zadávací dokumentaci stanoven předpokládaný rozsah využití jednotlivých tříd výrubu. Součástí provádění prací v souladu s navrženým řešením byl stálý geotechnický monitoring (GTM). Na základě jeho údajů byla v konkrétním místě personálem zhotovitele a správcem stavby důsledně a průběžně potvrzována či v případě potřeby měněna navržená TTV, tzn. způsob a zajištění ražby tunelu. Tím byl také aktualizován plán zatřídění ražeb.

Pro vyražení prvních 15 m tunelu pod ochranou mikropilotového deštníku byla predikována TTV II, ale skutečně zastižená byla TTV III. TTV II byla celým tunelem zastižena jen na přibližně 27 m délky a TTV I nebyla zastižena vůbec. Přitom projekt předpokládal cca třetinové zastoupení TTV– viz výše. Už asi po měsíci ražeb tak byla překročena předpokládaná spotřeba materiálu. Do toho přišly „covidové" problémy s dodávkou materiálu pro vyztužení ostění – tzn. se svorníky a KARI sítěmi.

Tým zhotovitele proto již v průběhu ražeb požádal o doplnění statického výpočtu o alternativní využití polypropylenových (PP) vláken u TTV II a TTV III. Součástí byl také přepočet zkrácení systémového kotvení z délky 6,0 m na 4,0 m, vzhledem k doposud naměřeným konvergencím, které se pohybovaly v rozmezí od 1,5 do 2,5 mm. Konečná konvergence výrubu tunelu do ustálení po ukončení ražeb byla velmi nízká, v průměru 2 až 9 mm.

Mezi nejvýznamnější změny, vycházející ze skutečného chování horninového masivu při ražbě a reflektující současně realitu „covidu" tak patřilo využití PP vláken v primárním ostění tunelu, mimo třídu TTV I a únikovou štolu a použití prefabrikovaných drenážních systémů.

5. VYUŽITÍ PP VLÁKEN V PRIMÁRNÍM OSTĚNÍ TUNELU

Na základě zadání zhotovitele byly provedeny průkazní zkoušky stříkaného vláknobetonu s PP vlákny MasterFiber 151, prováděného mokrým procesem (obr. 4). Průkazní zkoušky se uskutečnily již dva měsíce před předpokládaným zahájením ražeb. Byly nastříkány zkušební desky (obr. 5), na kterých probíhalo měření nárůstu pevnosti v čase, a ze kterých byly následně v laboratoři odvrtány a nařezány zkušební vzorky pro stanovení vlastností matérie.

Betonová směs SB25 J2 pro mokrý způsob stříkání, určená pro první vrstvu primárního ostění, byla vyrobená na betonárce podle receptury zadané zhotovitelem. Pro druhou vrstvu ostění a ostění únikové štoly byla vytvořena receptura FSB25 J2, spočívající v použití PP vlákna o množství 6,0 kg/m^3. Ze směsi byly na stavbě odebírány vzorky pro stanovení konzistence, objemové hmotnosti, a vyrobeny zkušební desky.

The 500m long double-track tram tunnel passing through the promontory of the Wilson Forest in Brno – Žabovřesky vacates the space of the existing tram body to increase the capacity of the road network of the Large City Ring Road (Fig. 1, 2). It has one tube, it is mined for the major part, but almost a third of its total length is formed by cut-and-cover portal sections. The route with counter curves is carried out on a longitudinal slope of 0.5%, saddle roof-like, with a track axes spacing of 3.1m. The tram trackwork in the tunnel consists of a slab track with elastically born grooved rails.

Cleaning recesses for reverse-side drainage are located in the cut-and-cover and false parts of the tunnel, which also serve as fire protection; the tunnel includes mined distribution substations LV R1 and LV R2 with connections to an escape adit. In both portal parts of the tunnel, there are niches for storing handcars for Fire Rescue Service, and possibly for service and maintenance work.

The escape adit is designed as a protected route for people to escape from the tram tunnel in the event of an accident, fire or other emergency. The dimensions of the finished escape adit for the movement of people are 1.7 × 2.5m, the length is 55.47m; it ends in a one-sided road gallery in the place of the emergency service lay-by. Unprotected escape routes in the tunnel are formed by two-sided walkways with a width of at least 1.0m along the tram line. The surface of the walkways is made of monolithic concrete with non-slip surface.

The inner surface of the vertical walls of the tunnel portals and the connected inner vaulted parts of the tunnel up to a distance of approximately 50m from the portal exits are provided with noise attenuation cladding (Fig. 3). Perforated aluminum lamellas with mineral wool, reaction to fire class A, are used for the cladding.

2. GEOLOGICAL CONDITIONS

The area of interest belongs to the geomorphological system of the Brno Highlands. From a regional-geological point of view, the site belongs to the Proterozoic period of the Brno massif. Lithologically, there are leucotonalites (Jundrov type) to quartzdiorites and metabasalts. The rock encountered in the tunnel by the excavation was significantly affected, especially tectonically, which negatively affected the progress of the excavations and led to overbreaks. The geological conditions and location of the project are described in more detail in paper [1].

3. ŽABOVŘESKÁ MINED TUNNEL

The tunnel was driven using the New Austrian Tunnelling Method. The construction of the tunnel in the primary lining was given in the tender documents [3] according to the quality of the rock environment by three assumed excavation support classes (TTV) I, II and III. The encountering of each excavation support class anticipated by the design was approximately 1/3 of the length of the tunnel for each class. The disintegration of the rock was carried out both with the use of blasting and mechanical disintegration, with mechanical cleaning of the excavation face. The profile of the tunnel was divided horizontally into a top heading and a bench. The tunnel excavation proceeded from the northern portal towards the south. Sprayed concrete SC25 of strength class C20/25 with strength increase range J2 and degree of environmental influence XA1 was designed for the primary lining. As reinforcement, KARI steel welded mesh Ø 6/100×100 was prescribed in excavation support classes II and III to the 200mm thick lining. For the lining 100mm thick in excavation support

Obr. 4 Nástřik zkušební desky z vláknobetonu na stavbě
Fig. 4 Spraying fibre reinforced conrete for a test plate on the construction site

Obr. 5 Čerstvý vláknobeton
Fig. 5 Fresh fibre reinforced concrete

Základní receptura byla určená pro statickou funkci materiálu D3S1. Definice podmínky D3S1 znamená při zatížení zkušebního tělesa v laboratoři 3 MPa průhyb nejvýše 1 mm. Této podmínky bylo dosaženo. Pevnost v tahu za ohybu stříkaného vláknobetonu tak byla stanovena na základě zkoušek. Projektantem RDS (realizační dokumentace stavby) byla do výpočtu zvolena jako střední hodnota tahové pevnosti $f_{fct,,fl}$ pevnost f_{fp} = 4,8 MPa, odpovídající minimální hodnotě ohybové únosnosti při vzniku první trhliny. Tato hodnota byla vybrána na základě literární rešerše tahové pevnosti vláknobetonu a drátkobetonu. Běžně je totiž uváděna tahová pevnost menší, než vyplynulo ze zkoušek provedených na zkušebních tělesech. Jako reziduální hodnota tahové pevnosti $f_{fctk,fl,res}$ pak byla zvolena zbytková ohybová únosnost f_r = 1,8 MPa, odpovídající průměrné hodnotě ze zkoušek provedených na zkušebních tělesech (Tab. 1).

Při realizaci byla nahrazena vnitřní vrstva KARI sítě PP vláknem dávkovaným 6 kg/m^3. Výhody, které z toho vyplynuly, byly dvě. Použití vláken jednak vyřešilo problémy s včasnými dodávkami dostatečného množství KARI sítí na stavbu a současně se zajistil kontinuální postup ražeb vedoucí k dokončení v plánovaném termínu. A nejen to – sumárně byly ražby zkráceny o jeden měsíc, navzdory zahájení proti plánu o měsíc později. Stříkaný beton s rozptýlenou PP výztuží byl použit i v primárním ostění štoly.

6. VÝSTAVBA TUNELU DVĚMA TECHNOLOGIEMI SOUČASNĚ

Práce na přesypané části na severu tunelu byly zahájeny těsně před začátkem ražeb. Technologicky tak šlo o dva tunely – první vznikající na povrchu (od provizorního portálu ražené části k definitivnímu portálu) a druhý uvnitř hory. Nezbytný manipulační prostor před vstupem do raženého tunelu byl zajištěn zatímním vynecháním čtyř dilatačních bloků přesypaného tunelu v souhrnné délce

class I, it was alternatively calculated to use fibre-reinforced shotcrete. Such a procedure was conditioned by the completion of an appendix to the static calculation based on the contractor‘s preconstruction tests; it was finally applied. The excavation and primary lining of the tunnel are described in detail in the paper [2].

4. CONTRACTOR'S RESPONSE TO COVID-19 AND MATERIAL SHORTAGES

Work on the Žabovřeská tunnel began in February 2021, at the top of the covid-19 season. The global pandemic also affected the manufacturing sector, which had an effect on the lack of some materials needed for the continuous progress of work (not only) on the Žabovřeská tunnel. The team of contractors therefore began to look for solutions that would dampen the effects of the crisis on the course of construction. Difficulties caused by the quality of the rock mass, which was lower than anticipated by the tender documents were added to the “covid” causes. The excavation support classes differed both in the rock disintegration procedure and in the type and number (strength) of supporting elements. On the basis of all available information on geological and hydrogeological conditions, the expected range of the use of individual excavation support classes was determined in the tender documents. Based on its data, the contractor’s and construction manager’s staff consistently and continuously confirmed or, if necessary, changed the designed excavation support class, i.e. the method and tunnel excavation support, in a specific location. In this way the excavation classification plan was also updated. Therefore, the contractor’s team already requested during excavations that an alternative use of polypropylene (PP) fibres was added to the static calculation of the excavation support classes II and III. A recalculation of the reduction of the length oof the system of anchoring from 6m to 4m taking into consideration the convergences measured so far, which ranged from 1.5 to 2.5mm. The final convergence of the tunnel excavation after stabilisation after the completion of excavations was very small, averaging 2 to 9mm.

Among the most significant changes, based on the actual behaviour of the rock mass during excavation and simultaneously reflecting the reality of “covid”, was the use of PP fibres in the primary lining of the tunnel, excepting support class I and the escape adit, and the use of prefabricated drainage systems.

5. USE OF PP FIBRES IN THE PRIMARY TUNNEL LINING

On the basis of the contractor’s specification, preconstruction tests of fibre reinforced shotcrete with MasterFiber 151 PP fibres, using the wet process, were carried out (Fig. 4). Preconstruction tests were already carried out two months before the expected start of mining. Test plates (Fig. 5) were sprayed, on which the strength increase over time was measured, and from which test samples were subsequently drilled and cut in the laboratory to determine the properties of the material.

SC25 J2 concrete mix for wet spraying, intended for the first layer of the primary lining, was produced in a concrete batching plant according to the formula specified by the contractor. The FSC25 J2 formula consisting of the use of PP fibres in the amount of 6.0kg/m^3 was developed for the second lining layer and the lining of the escape adit. Samples were taken from the mixture on the construction site to determine the consistency and bulk density, and test plates were made.

Tab.1 Vyhodnocení zkoušek stříkaného vláknobetonu

Označení	Stáří v době zkoušky	Délka	Šířka	Výška	Hmotnost	Objemová hmotnost podle ČSN EN 12390-7	Zatížení při vzniku první trhliny	Ohybová únosnost při vzniku trhliny f_{fp}	Maximální dosažené zatížení	Mezní ohybová únosnost f_{ult}	Maximální zatížení při průhybu 0,5–1,0 mm	Zbytková ohybová únosnost při průhybu 0,5–1,0 mm f_{r1}	Maximální zatížení při průhybu 0,5–2,0 mm	Zbytková ohybová únosnost při průhybu 0,5–2,0 mm f_{r2}	Minimální zatížení při průhybu 0,5–4,0 mm	Zbytková ohybová únosnost při průhybu 0,5–4,0 mm f_{r4}	Průměrná šířka tělesa v místě porušení	Průměrná výška tělesa v místě porušení	Vzdálenost středu trhliny od nejbližší podpory
	den	mm	mm	mm	kg	kg/m³	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa	mm	m,m	mm
6852/1	28	501,1	128,39	75,36	10,715	2210	7,70	4,8	7,74	4,8	3,64	2,3	3,64	2,3	6,64	2,3	128,6	75,1	153
6852,2	28	503,0	126,81	75,02	10,683	2233	10,70	6,7	10,74	6,7	2,35	1,5	2,35	1,5	2,35	1,5	126,9	75,2	175
6852,3	28	502,2	126,40	74,50	10,640	2250	9,59	6,1	9,63	6,1	2,11	1,3	2,1	1,3	2,11	1,3	126,6	75,0	192
6852,4	28	503,1	124,29	74,76	10,476	2241	8,54	5,4	8,59	5,5	3,06	2,0	3,06	2,0	3,06	2,0	124,1	75,4	188
průměrná hodnota						2230		5,7		5,8		1,8		1,8		1,8			
nejistota (±)						–		–											

Table 1 Evaluation of fibre reinforced shotcrete tests

Marking	Age at the time of testing	Length	Width	Height	Weight	Bulk density according to CSN EN 12390-7	Load at first cracking	Flexural capacity f_{fp} at cracking	Maximum reached load	Ultimate flexural capacity f_{ult}	Maximum load at deflection 0.5–1.0mm	Residual flexural capacity at deflection 0.5–1.0mm f_{r1}	Maximum load at deflection 0.5–2.0mm	Residual flexural capacity f_{r2} at deflection 0.5–2.0mm f_{r2}	Minimum load at deflection 0.5–4.0mm	residual flexural capacity f_{r4} at deflection 0.5–4.0mm f_{r4}	Average width of specimen at the failure	Average height of specimen at the failure	Sparing between the centre and the closest support
	day	mm	mm	mm	kg	kg/m³	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa	mm	m.m	mm
6852/1	28	501.1	128.39	75.36	10.715	2210	7.70	4.8	7.74	4.8	3.64	2.3	3.64	2.3	6.64	2.3	128.6	75.1	153
6852.2	28	503.0	126.81	75.02	10.683	2233	10.70	6.7	10.74	6.7	2.35	1.5	2.35	1.5	2.35	1.5	126.9	75.2	175
6852.3	28	502.2	126.40	74.50	10.640	2250	9.59	6.1	9.63	6.1	2.11	1.3	2.1	1.3	2.11	1.3	126.6	75.0	192
6852.4	28	503.1	124.29	74.76	10.476	2241	8.54	5.4	8.59	5.5	3.06	2.0	3.06	2.0	3.06	2.0	124.1	75.4	188
average value						2230		5.7		5.8		1.8		1.8		1.8			
uncertainty (±)						–		–											

32 m (obr. 6). Po slavnostní prorážce ražené části byla zprovozněna jižní strana pro nezbytnou logistiku a zahájily se práce na zbylých čtyřech blocích s definitivním uzavřením tunelu do jednoho celku. Před tím musela být dokončena rubová drenáž a hydroizolace v ražené části pro navázání hydroizolace z vnitřní strany ražené části na vnější povrch přesypaného tunelu. K oddilatování zde posloužila gumová hadice Ø 73 mm, položená na přesahující falešné primární ostění (předštítek) a izolace obou částí tunelu mohly být spojeny.

Rubovou drenáž v raženém tunelu tvoří předem tvarované profily na bázi tuhého polyvinylchloridu (PVC-U). Základní úhelník je položený na podkladní beton. Do něj se vloží drenážní perforovaná trouba a provede se obsyp těženým štěrkem frakce 16/32. K takto připravené konstrukci byla následně teplotním svárem uchycena hydroizolační fólie.

7. REALIZACE NEVYZTUŽENÉHO SEKUNDÁRNÍHO OSTĚNÍ

Sekundární ostění raženého tunelu je nevyztužené, vyjma čtyř bloků – obou portálových, a dvou bloků s napojením na rozvodnu R1 a R2 s únikovou štolou, které jsou vyztužené. Pro betonáž klenby tunelu byla použita ocelová forma délky 8 m, pro přesypané části bylo použito navíc bednění rubu ostění. Jeden betonážní takt trval do 24 hodin, včetně najetí formy, jejího očištění, betonáže a odbednění. Pro přesypanou část sekundárního ostění byla zpracována receptura s hodnotou konzistence S5 betonové směsi. Pro

The basic formula was intended for the static function of the D3S1 material. The definition of condition D3S1 means a deflection of no more than 1mm when the test specimen is loaded by 3MPa in the laboratory. This condition was met. The flexural tensile strength of fibre reinforced sprayed concrete was thus determined on the basis of tests. The designer of the detailed design chose the strength f_{fp} = 4,8MPa as the mean value of the tensile strength $f_{fct,fl}$, corresponding to the minimum value of the bending capacity at the appearance of the first crack. This value was chosen on the basis of a literature search of the tensile strength of fibre reinforced concrete and steel fibre reinforced concrete. Usually, the stated tensile strength is lower than the strength resulting from the tests carried out on test specimens. As the residual value of the tensile strength $f_{fctk,fl,res}$, the residual bending capacity f_r = 1,8 MPa was chosen, corresponding to the average value from the tests performed on the test specimens (Tab. 1).

During construction, the inner layer of the KARI mesh was replaced by PP fibres dosed at 6kg/m³. Two advantages resulted from this solution. On the one hand, the use of fibres solved the problems with the timely delivery of a sufficient amount of KARI mesh to the construction site, and at the same time, it ensured a continuous tunnel excavation process leading to the completion on the planned date. And not only that – in total the excavation duration was shortened by one month, despite starting a month later in comparison with the schedule. Sprayed concrete with PP fibre reinforcement was also used in the primary lining of the adit.

Obr. 6 Pracovní mezera mezi raženým a přesypávaným úsekem – pohled z přesypávaného tunelu
Fig. 6 Working gap between the mined tunnel and false tunnel – viewed from the false tunnel

správné technologické provedení sekundárního ostění s omezením tvorby trhlin byl zvolený následující postup [4]:

- zvolená kratší délka pásů 8 m, daná malými poloměry trasy (190 m) a potřebou omezení vzniku trhlin;
- použití mezilehlé fóliové izolace mezi primárním a sekundárním ostěním;
- použití betonové směsi s nízkým hydratačním teplem;

Obr. 7 Výstavba pevné jízdní dráhy
Fig. 7 Construction of slab track

6. TUNNEL CONSTRUCTION USING TWO TECHNOLOGIES SIMULTANEOUSLY

Work on the false part in the north of the tunnel started just before the start of the mining operations. Technologically, there were two tunnels – the first originating on the surface (from the temporary portal of the mined part to the definitive portal) and the second one inside the massif. The handling space necessary before entering the mined tunnel was ensured by the temporary omission of four expansion blocks of the false tunnel with a total length of 32m (Fig. 6). After the ceremonial breakthrough of the mined part, the southern side was put into operation for the necessary logistics and work began on the remaining four blocks and the final closing of the tunnel into one unit. Before that, reverse-side drainage and waterproofing in the mined part had to be completed in order to connect the waterproofing from the inside of the mined part to the outer surface of the false tunnel. A Ø 73mm rubber hose was used for the expansion here. It was placed on the protruding false primary lining (pre-tunnel canopy) and the waterproofing of both parts of the tunnel could be joined.

The reverse-side drainage in the mined tunnel consists of in-advance formed profiles based on rigid polyvinyl chloride (PVC-U). The basic angle is placed on the underlying concrete, a perforated drainage pipe is inserted into it and is backfilled with excavated gravel fraction 16/32. A waterproofing membrane was then attached by thermal welding to the structure prepared in this way.

7. CONSTRUCTION OF UNREINFORCED FINAL LINING

The final lining of the mined tunnel is unreinforced, except for four blocks – both portal blocks, and two blocks connected to substations R1 and R2 with the escape adit, which are reinforced. An 8m long steel formwork was used for the concreting of the tunnel vault. The formwork on the reverse side of the lining was used in addition for the false tunnel parts. A formula with a consistency value S5 of the concrete mixture was developed for the false tunnel part of the final lining. The following procedure was chosen for the correct technological execution of the secondary lining with the limitation of cracking [4]:

- the chosen shorter length of the blocks of 8m, given the small radii of the route (190m) and the need to limit cracking;
- the use of intermediate waterproofing membrane between the primary and final linings;
- the use of a concrete mixture developing a low hydration heat;
- the use of a concrete mixture with a slow strength buil-up in the initial period after concreting;
- striking the formwork when the concrete strength is around 3 to 5MPa;
- curing of concrete after formwork is removed with a focus on limiting its drying and alleviating the thermal shock (air-conditioned travellers);

- použití betonové směsi s pomalým náběhem pevnosti v počátečním období po betonáži;
- odbednění formy při pevnosti betonu okolo 3 až 5 MPa;
- ošetřování betonu po odbednění se zaměřením na omezení jeho vysychání a zmírnění tepelného šoku (klimavozy);
- použití bednicího vozu s pláštěm dobré tepelné vodivosti (ocel).

V tunelu bylo omezeno proudění vzduchu zavěšením pásů geotextilie na portálech a také před a za bednicí formou. Od přelomu klimatického období podzim/zima byla dále využívaná výhřevná tělesa v min. počtu 4 ks, umístěná přímo ve formě. Po odbednění a posunutí byly za formou taženy klimavozy, opatřené nafukovacími manžetami pro utěsnění prostoru mezi lícem ostění a pláštěm vozu. Po odbednění zrajícího betonu byl na povrch nanesen přípravek MasterKure 220 zamezující výpar vody. V období podzim/zima byly aplikovány vrstvy dvě.

Zvláštní pozornost byla věnována v zimních měsících dodržování teploty betonu na stavbě, která nesměla klesnout pod 16 až 18 °C. Proto bylo nutné na betonárce ohřívat záměsovou vodu. Nicméně i přes to dokázala teplota betonu v zimních měsících výrazně zpomalit nebo naopak zrychlit náběh pevnosti betonu a postup prací. Zvláštní pozornost byla věnovaná také vztlakovým silám od betonu uloženého ve formě. To vyžadovalo stavět formu níže – o 1 až 3 cm pod teoretickou hranu sekundárního ostění. Nedodržení tohoto kroku mohlo způsobit trhlinu v sousedící klenbě s dosud relativně čerstvým betonem. Dalším požadavkem, a to nejen z estetických důvodů, bylo důsledně dbát na důkladné čištění povrchu formy. Dokončené sekundární ostění s pevnou jízdní dráhou je na obr. 7.

Pro správný čas odbednění byl nárůst pevnosti betonu kontrolován Schmidtovým kladívkem s nástavcem pro nízké pevnosti do 5,0 MPa. Proběhly také ověřovací zkoušky náběhové pevnosti betonové směsi v laboratoři. Odbedňování tak probíhalo v souladu se získanými hodnotami.

8. ZÁVĚR

Žabovřeský tramvajový tunel byl v mnoha ohledech specifický. Navzdory všem problémům byla hrubá stavba tunelu ukončena podle harmonogramu. Využití rozptýlených PP vláken se ukázalo jako vhodná alternativa k tradiční ocelové výztuži, a to i ve velmi rozpukaných skalních horninách. Stavba se díky tomuto řešení značně urychlila. K časové úspoře přispělo také použití prefasystému rubové drenáže. Časově se stavba tunelu od prvního kopnutí do země po poslední velkou betonáž odehrála v horizontu jednoho roku, konkrétně od února 2021 do února 2022. Zvládnutí problémů na stavbě by také nebylo možné bez výborné spolupráce s investorem, jeho technickým dozorem, zpracovatelem RDS, geotechnickým monitoringem a ostatními členy sdružení EUROVIA – HOCHTIEF – SUBTERRA.

Ing. DALIBOR STROMČEK, DStromcek@subterra.cz,
Ing. ANDREJ KORBA, AKorba@subterra.cz, Subterra a.s.

Recenzoval Reviewed: Ing. Jan Korejčík

- the use of a tunnel form traveller with a good thermal conductivity (steel) shell.

Air flow was restricted in the tunnel by hanging geotextile strips at the portals as well as in front of and behind the formwork. Since the turn of the autumn/winter climatic period, a minimum of 4 heaters installed directly in the formwork were used. After striking the formwork and shifting it, air-conditioned travellers were pulled behind the formwork, equipped with inflatable sleeves to seal the space between the surface of the lining and the mantle of the traveller. After stripping the curing concrete, MasterKure 220 preventing water evaporation was applied to the surface. In the autumn/winter period, two layers were applied.

Special attention was paid in the winter months to maintaining the temperature of the concrete on the construction site, which was not allowed to drop below 16 to 18°C. Therefore, it was necessary to heat the mixing water at the batching plant. However, despite this, the temperature of the concrete in the winter months was able to significantly slow down or, on the contrary, speed up the development of concrete early strength and the progress of work. Special attention was also paid to the buoyancy forces exerted by the concrete cast in the formwork. This required building the formwork lower, – 1 to 3cm below the theoretical edge of the secondary lining. Failure to follow this step could have caused a crack in the adjacent vault where the concrete was still relatively fresh. Another requirement, and not only for aesthetic reasons, was to consistently pay attention to the thorough cleaning of the surface of the formwork. The completed secondary lining with a slab track is shown in Fig. 7.

For determining the correct striking time, the increase in concrete strength was checked with a Schmidt hammer with an attachment for low strengths up to 5.0MPa. Verification tests of the early strength of the concrete mixture were carried out in the laboratory. The striking of the formwork took place in accordance with the obtained values.

8. CONCLUSION

The Žabovřeská tram tunnel was specific in many ways. Despite all the problems, the tunnel was structurally completed according to the schedule. The use of PP fibre reinforcement has proven to be a suitable alternative to traditional steel reinforcement, even in highly fractured rock. Thanks to this solution, the construction was considerably accelerated. The use of the prefabricated system of reverse-side drainage also contributed to time savings. In terms of time, the construction of the tunnel, from breaking the ground to the last major concreting, took place over a period of one year, namely from February 2021 to February 2022. Coping with the problems on the construction site would also not be possible without excellent cooperation with the client, his technical supervision, author of the detailed design, geotechnical monitoring and other members of the EUROVIA – HOCHTIEF – SUBTERRA consortium.

Ing. DALIBOR STROMČEK, DStromcek@subterra.cz,
Ing. ANDREJ KORBA, AKorba@subterra.cz, Subterra a.s.

LITERATURA / REFERENCES

[1] ROŽEK, J. Tramvajový tunel při Velkém městském okruhu Žabovřeská v Brně. *Tunel*, 2021, č. 1, str. 46–53.
[2] DOHNÁLEK, V., STROMČEK, D., KORBA, A. Tramvajový tunel Žabovřeská – zkušenosti z dosavadního průběhu výstavby. *Tunel*, 2021, č. 4, str. 42–53.
[3] ZHOŘ, M. I/42 Brno Žabovřeská I etapa II – technická zpráva RDS C605.1. Praha: Metroprojekt a.s., 04/2021, 14 str..
[4] BERGER, D. I/42 Brno Žabovřeská I etapa II – průvodní zpráva z DSPS. Brno: PK OSSENDORF s.r.o., 07/2019, 11 str.